

恒星スペクトルデジタルアトラスの作成

定 金 晃 三¹ , 乗 本 祐 慈² , 松 岡 友 和^{1, 4} ,
 大 久 保 美 智 子^{1, 3} , 木 村 佳 代¹ , 清 水 智 美¹ ,
 久 形 陽 子¹ , 安 部 麻 衣 子¹ , 後 藤 百 美 子¹ ,
 漬 滝 茜¹ , 平 田 龍 幸³ , 粟 野 諭 美⁴

1 <大阪教育大学 〒 582-8582 大阪府柏原市旭が丘 4 丁目 698-1>

e-mail: sadakane@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

2 <国立天文台岡山天体物理観測所 〒 719-0232 岡山県浅口郡鴨方町本庄>

3 <京都大学理学部 〒 606-8502 京都市左京区北白川追分町>

4 <岡山天文博物館 〒 719-0232 岡山県浅口郡鴨方町本庄>

2001 年 4 月から 2002 年 12 月にかけて、岡山観測所 91cm 望遠鏡に取り付けた小型分光器を用いて北天の明るい恒星約 600 個の中分解能 ($R \sim 3000$ から 6000) スペクトルを得た。観測は CCD を使って行われ、観測波長範囲は 4000 Å から 5200 Å (青領域) と 6300 Å から 6800 Å (赤領域) の 2 領域である。MK 二次元分類の大部分のサンプルの他、輝線星、各種の特異星、加えて少数ではあるが星雲や銀河のデータも含まれている。得られたデータからスペクトルアトラス (画像とグラフ) を作成し、公開することにした。一次元化されたスペクトルデータはネットワークを通してダウンロード出来るので、目的に応じて自由に活用できる。

1. はじめに

1977 年に東京大学出版会から一冊の写真集が出版された。そのタイトルは『An Atlas of Representative Stellar Spectra』といい、山下泰正氏、成相恭二氏、乗本祐慈 (いずれも当時東京天文台) の 3 人によって作成された、恒星のスペクトル写真を配列したアルバムである。この写真集は、主として恒星物理の研究者向けのもので、Morgan, Keenan and Kellman (1942)¹⁾を開祖とする恒星のいわゆる MK 二次元分類の基準となる星のスペクトルを系統的に配列している。観測は国立天文台岡山天体物理観測所 91cm 望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けた小型分光器 (通称 Z 分光器) を用い、写真乾板上に記録された。観測波長域は 3800 Å から 4900 Å までであり、伝統的な分光分類に使われる一回電離

カルシウム (CaII) H, K 線から $H\beta$ が含まれている。この写真集は紙に印刷されたもので、利用者が加工したり、あるいは測定のために使うことは困難である。我々は CCD を使うことでこの難点を克服し、研究者のみならず一般の人 (アマチュア, 学生) が自由に閲覧あるいは加工して利用することが可能なデータ集の構築を試みることにした。ここで紹介するデジタルアトラスは以下の特徴を持つ。

- 1) 青波長域のデータと $H\alpha$ を中心とする赤波長域のデータがペアになっている。
- 2) 個々の天体のスペクトルデータがテキストファイルあるいは FITS 形式のデータとしてダウンロードできる。
- 3) 学習上の便宜を図るため、星図や HR 図の上から天体のスペクトルにアクセスが可能である。

表 1 スペクトル型ごとの星の数

スペクトル型	I	II	III	IV	V	その他
O	7	1	1	0	8	7
B	17	5	40	39	91	8
A	5	1	15	16	64	19
F	8	5	13	16	19	7
G	9	6	41	5	13	0
K	6	11	57	2	6	0
M	5	5	21	0	1	0

注：その他としたのは、MK 分類の光度階級のデータが参照した文献 (Garcia, 1989,²⁾ Hoffleit and Jaschek, 1982³⁾) に与えられていないもので、特異星などが含まれる。

2. 観測とデータ処理

観測に用いられた分光器は、旧堂平観測所 91 cm 望遠鏡用に日本光学 (株) によって 1960 年代に製作されたもので、同観測所の閉鎖に伴い 2000 年 4 月に岡山へ移送された。この分光器は写真乾板を使う構造になっていたが、乾板取り付け部分に CCD カメラが取り付けられるような改造を行い、2000 年夏に簡易 CCD カメラを用いて岡山で試験観測を行った。結果として、冷却の効く CCD カメラを使えば十分実用に耐えることが判明し、2000 年度末にはペルチエ冷却式 (零下 90 度まで可能) の 2048 × 512 ピクセルの CCD カメラを購入することが出来た。本格的な観測は 2001 年 4 月に開始し、91 cm 望遠鏡の所長預かり時間を利用しながら 2002 年 12 月まで断続的に行った。この間に計 71 夜の晴夜があり、日本から観測可能なほぼ全天域 (52 星座) にわたって、主に 6 等より明るい計 600 個以上の恒星のデータが得られた。ただし、赤緯 +70 度以北の天体は、分光器が望遠鏡のフォークに当たるため観測出来なかった。青波長域は 4000 Å から 5200 Å までを含み、600 本/mm の回折格子を使って観測した。赤波長域は 6200 Å

から 6800 Å を含み、ここでは 1200 本/mm の回折格子が使われた。天体の観測の前後にはダークイメージを観測し、波長較正のために Fe-Ne (鉄-ネオン) ランプのスペクトルを取得した。CCD の感度補正のためにドームフラットのデータを多数取得した。データ解析は IRAF を用いて通常の手順で行われ、最終的には波長スケールを実験室系に変換し、連続光レベルを 1 に規格化した一次元スペクトルが得られた。青波長域での波長分解能は約 3000、赤波長域でのそれは約 6000 である。明るい (5 等級) A 型星の場合、連続光レベルの SN 比は平均して 350 以上になっている。このようにして観測された恒星の二次元分類上の数の分布を表 1 に示す。観測は見かけの等級が明るいものに偏っているため、B 型星が多数ある一方で、M 型のわい星 (主系列星) は非常に数が少ない。この表に含まれていない天体として、高い温度の特異な星 (ウオルフ-ライエ (WR) 星) や低温の特異な星 (炭素星や S 型星)、さらに、T Tau や白色わい星などがある。その他太陽系天体 (惑星) や、少数ではあるが星雲、銀河のスペクトルも取得したので併せて公開することにした。(表 1)

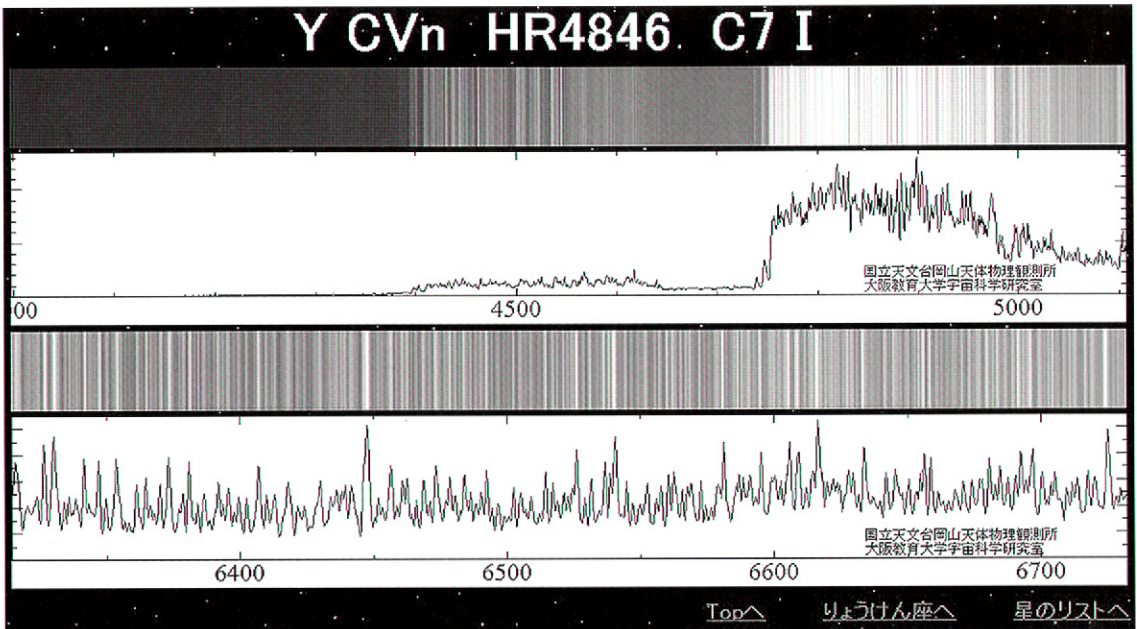
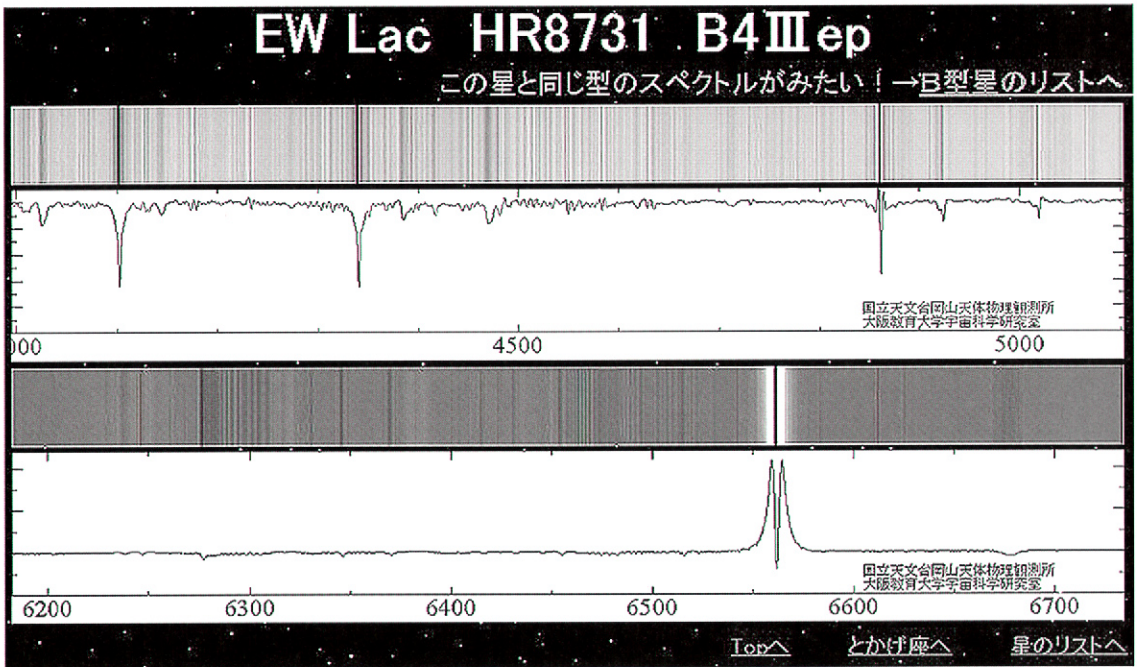
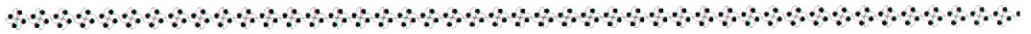


図1 個々の星のデータ。見本として、B型輝線星 EW Lac (HR 8731) と炭素星 Y CVn (HR 4846) を示す。EW Lac では $H\alpha$ にダブルピークの輝線が見え、 $H\beta$ にも弱いながら同様の輝線が見える。Y CVn では $H\alpha$ も確認しがたい。この星の青波長域 (4400 Å 以下) にはほとんどフラックスが無く、連続光レベルへの規格化は不可能である。

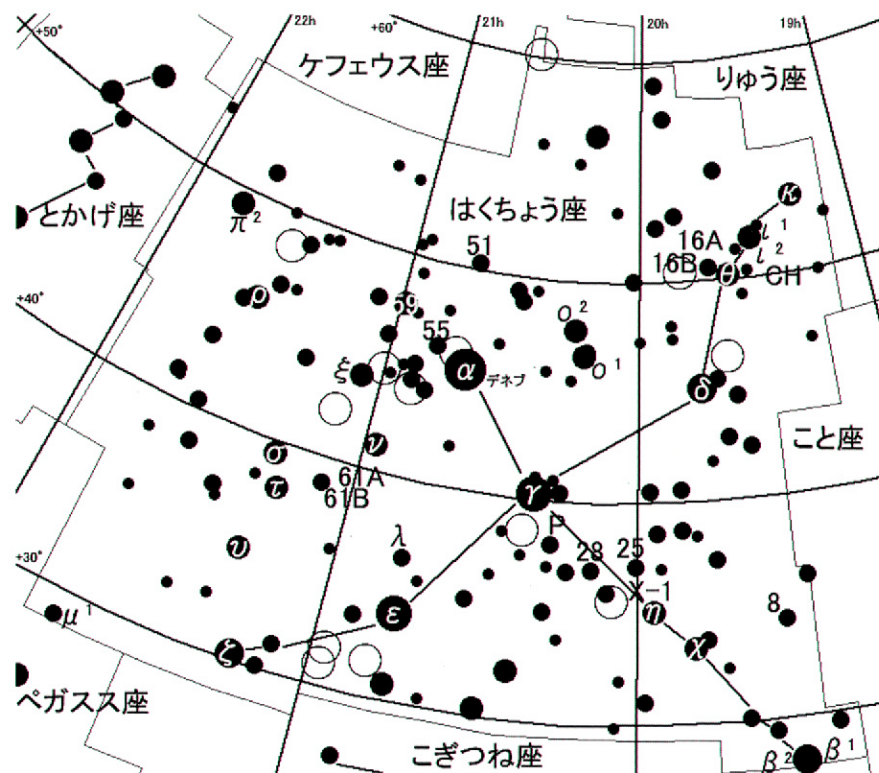


図2 星座表示の一例として、はくちょう座の図を示す。星の上またはそばに文字のある場合、その星のスペクトルデータを閲覧できる。はくちょう座だけでも30個以上の星が観測され、中にはX線源として著名なCyg X-1 = HDE 226868や、共生星CH Cygも含まれている。

3. 公開用の加工

一次元化されたスペクトルデータは、普通は波長に対して光の強度をプロットしたグラフの形で使用するが、初学者にとってこの表現は必ずしも分かりやすいものではない。スペクトルデータを可視化するために、横尾武夫氏（大阪教育大学）作成のプログラムを利用させてもらうことにした。このプログラムは、数値表現されたデータ点を256階調の明るさの並びとして表現するもので、まず一列のデータを作ってそれを複製して並べれば、あたかも写真のようなスペクトル画像ができる。これをビットマップデータとして保存し、市販の画像処理ソフトを使ってコントラスト等の微調整を行った。今回公開する600個あまりのすべてデータ（1200組あまり）についてこのやり方で図を作り、それに添えてグラフのデータも同時に表示できるようにした。（図1）

初学者のためには、いきなりMK二次元分類の表から入るより、星空の散歩をしながら、あの星この星と見ていく方がとっつき易いだろうと考えて、観測した52星座を季節ごとに分け、それぞれの星座のページに入ってデータのある星をクリックすれば、スペクトルデータ（図とグラフの組み合わせ）が見られるようにした。見慣れた星座の見慣れた星も一個一個違う表情をもつことを知ってもらうことが狙いである。（図2）

天文学を少し学習した人には、HR図の上の色々な場所にある星がどのようなものかを知ること重要と考えて、代表的な星をHR図上に並べた絵からもとどれるようにした。巨星とわい星はどのように違うかを理解するのに役立つと思われる。また、このHR図の上にはT Tauや白色わい星もある。

MK分類の温度系列と光度階級によって星のス



A0型

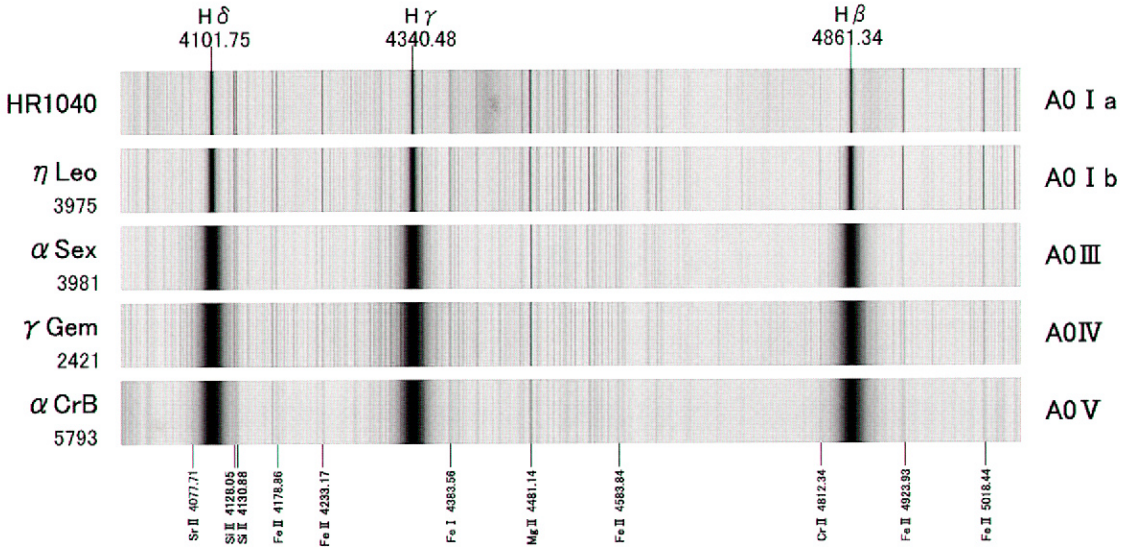


図3 恒星スペクトルの見本Ⅰ：A0型星における絶対等級効果を青波長域で示す。パルマー線が上（超巨星）から下（主系列星）へ向かって強くなっていく様子がよくわかる。

国立天文台岡山天体物理観測所
大阪教育大学 宇宙科学研究室

A0型

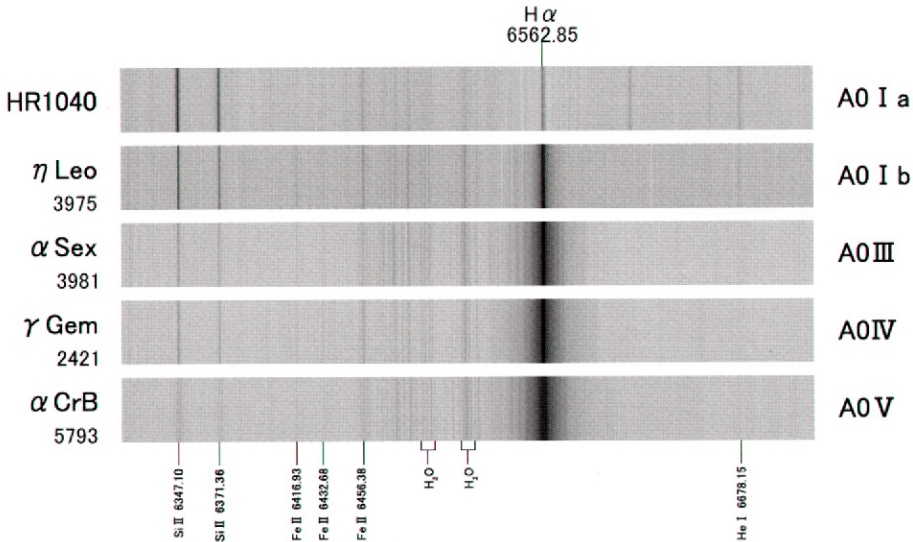


図4 恒星スペクトルの見本Ⅱ：A0型星における絶対等級効果を赤波長域で示す。パルマー線（Hα）の変化とは逆に、一回電離けい素の線（Si II 6347.1, 6371.4）は下から上に向かって強くなっていく。

国立天文台岡山天体物理観測所
大阪教育大学 宇宙科学研究室

ペクトルがどのように変化するかを見るために、スペクトル図を並べ、注目すべき主な線スペクトルを示した図を青と赤の両波長域で作成した。一例を図3, 図4で示す。

4. 公開データ

データはウェブ上で公開することとし、一般向けと研究者向けの二本立てのページを作成した。まず、一般向けには、星座から辿れる部分をメインとして、HR図, 分類表などからも閲覧できるようにした。さらに、初学者向けにスペクトルと恒星

の分類の意味を解説したページも付け加えた。研究者向けのページの中心は、観測した星全部をまとめた表である。この表には、星の名前、輝線星カタログ (HR) 番号, HD 番号, ヒッパルコスカタログ番号, MKタイプ, 実視等級, 色指数 ($B - V$), 年周視差等のデータが載せてある。個々の星の名前をクリックすれば、図1の例に示したようなデータを閲覧できる。さらに、青と赤の波長域に分けて、数値データをダウンロードできるスイッチが個々の星で設定されている。このページではMK分類の基準星とされる星のスペクトルを並べたアトラスも公開されている。以上のデータは岡山観測所と大阪教育大学宇宙科学研究室のホームページで公開されているので、役立てていただければ幸いです*。

5. データ活用の一例

公開したデータは様々な形で利用されることを願っている。多少専門的ではあるが、このような使

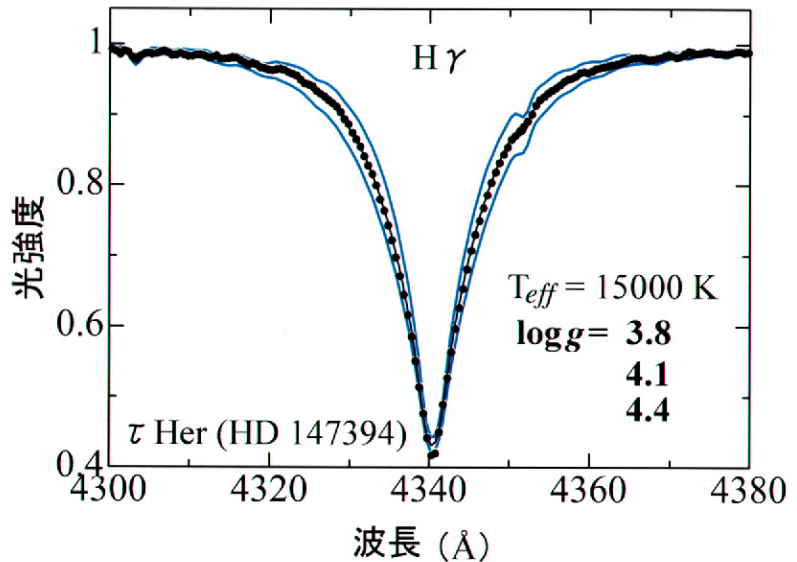


図5 τ Her (B5 IV)の $H\gamma$ プロファイル。観測 (黒丸) と計算からの予想 (青実線と黒実線) を比較して、この星の表面重力加速度の大きさを推定することができる。

い方もできるという一例を示したい。B型やA型の星で最も目立つのは水素のバルマー系列の線である。これらの星の分光解析をするには、対象とする星の表面大気を特徴付けるパラメーター (有効温度と表面重力加速度) を決める必要があるが、バルマー系列の吸収線の形 (プロファイル) の測定が役に立つ。一例として、B5IV型の星 τ Her (HR6092 = HD147394) の表面重力加速度 ($\log g$) を $H\gamma$ 線を使って決定する試みを示す。この星の有効温度は、測光観測のデータなどから約15000Kであることが知られているので、ここでは15000Kを仮定することにする。この程度の温度の星では、バルマー線は幅の広いウイング (翼) を示すが、その広がりにはシュタルク効果と呼ばれるもので決まっている。その効果の効き方は、電子密度が高いほど大きく、主系列星のような密度の高い星になるほど (すなわち、 $\log g$ の大きい星ほど)

* URL : <http://www.oao.nao.ac.jp/>
<http://galaxy.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/atlas/STORY/top/top.htm>

良く効くことが知られている。そのことを利用して、大気モデルの予言と実際に観測されたプロファイルと比較することで、 $\log g$ を決めることができる。図5は、 τ Her で観測された $H\gamma$ 線のプロファイル (黒丸) と Kurucz(1993)⁴⁾ の有効温度 15000K のモデル大気で3種類の $\log g$ の値 (3.8, 4.1, 4.4, 常用対数値, cgs 単位) を仮定した場合に予想されるプロファイル (青実線, 黒実線, 青実線) を比較したものであり、4.1 の場合が最も良く観測を再現することが分かる。今回公開したデータは SN 比が良い上、広い波長範囲を一度にカバーした観測なので、B 型や A 型の星の幅の広いバルマー線のプロファイルを正確に測定することができる。この特徴を生かせば、波長分解能数 1000 のスペクトルでも学術的な利用が可能なが分かる (図5)。

6. 今後の使い方について

多数の恒星スペクトルの取得を目的とした 91 cm 望遠鏡での観測プロジェクトは終了したが、使われた分光器にはまだ使い道があるように思える。2年間の観測期間中にあった出来事として、激変星の観測が挙げられる。2001年7月23日夜に20年ぶりにバースト (突発的な増光) が観測された WZ Sge の極大時のスペクトルを、7月24日から連続4夜、数分の時間分解能で分光観測し、極大時のディスク構造の情報を得ることができた (Baba et al. 2002)⁵⁾。この例から分かるように、小口径望遠鏡であっても機動性を確保した使い方が出来れば、価値のある研究が出来る観測装置である。2002年3月には、188 cm 望遠鏡のカセグレン焦点に装着して、銀河の低分散分光観測のテストを行った。結果として、17等級までの銀河や QSO の観測は十分行えることが確認された。使いやすさを向上させるためには、スリット監視カメラなどの改善が必要なが指摘された。さらに、教育的な目的での使い方も考えられるので、いくつかの改修を行った上で有効な利用が行われることを望みたい。

91 cm 望遠鏡で観測を行った2年間にわたり、岡山観測所の職員の皆さんと川端弘治氏 (国立天文台) に一方ならぬお世話になったことを記し、感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Morgan W.W., Keenan P., Kellman L., 1942, An Atlas of Stellar Spectra (University of Chicago Press)
- 2) Garcia B., 1989, A List of MK Standard Stars, Bull. Inform. CDS 36
- 3) Hoffleit D., Jaschek C., 1982, The Bright Star Catalog, 4-th Edition (Yale University Observatory, New Heaven)
- 4) Kurucz R.L., 1993, Kurucz CD-ROM 13, (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)
- 5) Baba H., Sadakane K., Norimoto Y., Ayani K., Ioroi M., Matsumoto K., Nogami D., Makita M., Kato T., 2002, PASJ 54, L7

A Digital Stellar Spectral Atlas

Kozo SADAKANE, Tomokazu MATSUOKA, Michiko OHKUBO, Kayo KIMURA, Tomomi SHIMIZU, Youko HISAGATA, Maiko ABE, Yumiko GOTOU, Akane TSUETAKI

Astronomical Institute, Osaka Kyoiku University, Asahigaoka-4, Kashiwara-shi, Osaka 582-8582 Japan

Yuji NORIMOTO

Okayama Astrophysical Observatory, NAOJ, Kamogata-cho, Okayama 719-0232 Japan

Ryuko HIRATA

Department of Astronomy, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502 Japan

Yumi AWANO

Okayama Astronomical Museum, Kamogata-cho, Okayama 719-0232 Japan

Abstract: Intermediate resolution optical region spectra of more than 600 bright stars have been obtained at the Okayama Astrophysical Observatory using the 91 cm reflector. Spectra covered two wavelength regions; the blue (4000 - 5200 Å) and the red (6300 - 6800 Å) regions. The observed sample covers the wide range of MK spectral classes. Digital spectral data of these objects have been put into the public domain and can be retrieved via the Internet.